Pièce annexe 2
Géothermie sous la zone de Bure : températures

Résumé :

Suite à la note de A. Mourot de 2002, l'Andra a menti pendant 8 ans sur la seule donnée relevant du gradient de température en sa possession. Suite au forage EST433 de 2008, l'Andra a donné une valeur plus basse qu'elle ne l'est en réalité. Il n'est pas fait état de la cible permienne plus profonde, non étudiée. Sa température doit atteindre 160°C.

I. Rôle du gradient de température....1
II. L'Andra a menti pendant plusieurs années....2
III. Forage EST433, rabotage de la température et données partielles....4
IV. Diagraphies postérieures....5
V. Au-delà du Trias....5

I. Rôle du gradient de température

La température est l'un des paramètres importants d'une ressource géothermique. Plus elle est élevée et plus la ressource sera favorable. Tant qu'aucun forage à la cible n'a été réalisé, la température est estimée au moyen du gradient local (en degrés par centaine de mètres) que l'on applique au lieu et à la profondeur d'intérêt en partant de la température de surface. Cette dernière est donnée, par exemple, par la température moyenne des sources superficielles qui, à Bure, est de 10°C (voir document 13 : *Andra 2010, t.1, p. 175*).

Ainsi, pour un gradient de 3°C/100m, à 2000 m on aura : (20 × 3) + 10 = 70°C.

Une seule donnée du gradient a été mesurée en 8 ans : 3°C/100m

Avant que ne soit fait le forage EST433 en 2008, un seul forage un peu profond avait été réalisé : le HTM102, le tout premier réalisé à l'arrivée de l'Andra, terminé avant la fin de l'année 1994 et d'une profondeur de 1100 m. Aucun autre forage n'atteindra même les 800 m.

L'opérateur du forage HTM102 décrit ses mesures (voir document 59 : *Géoservices 1995, scan sur la p. 80*) :

figure 50).

5.4.1 Thermométrie

La diagraphie de température a mis en évidence un gradient géothermique de 5ºC/100m, supérieur au gradient habituel de 3ºC/100m (cf. figure 50). Toutefois, la température mesurée à 1070 m/sol (42,5ºC) est cohérente avec un gradient géothermique de 3ºC/100m, ce qui correspond aux valeurs relevées régionalement qui indiquent des températures comprises entre 60 et 65 deg.C à 1500m de profondeur (Atlas of Subsurface Temperature in the European Community). Cette anomalie est probablement due aux perturbations thermiques engendrées par les tiges 5" dont la présence était rendue nécessaire par l'instabilité des marnes de Longwy (Dogger) et des marnes à septaria (Lias supérieur). Il existe une anomalie thermique entre 705 m/sol et la base des tiges 5" (cf. 3 figure 50) qui pourrait être due à une production d'eau de formation dans cet intervalle, ceci est toutefois peu probable compte tenu de la lithologie du Toarcien (argiles et schistes).

La donnée de l'opérateur est que le gradient moyen entre la surface et la base du forage est de 3°C/100m (calcul : 42,5 - 10 = 32,5 ÷ 10,7 = 3,03°C/100m), " *ce qui correspond aux valeurs régionales normales* " écrit-il.

Forcément, si le gradient apparent est de 5°C/100m en fond de forage pour une moyenne de 3°C/100m sur toute sa hauteur, sa valeur est inférieure à 3°C/100m en partie haute. Dans ce cas précis, avec les tiges 5" mentionnées, elle est de 2,04°C/100m entre 0 et 700 m (~ 24,3°C à 700m) (voir document 59 : *Géoservices*

1995, fig. 50, p. 81). Plus tard, probablement suite à une stabilisation thermique, l'Andra donnera 2,5 °C/100m dans les 600 m supérieurs de ce forage (voir document 35 : *Andra 2004 b, p. 15*).

Les raisons de ces variations du gradient géothermique avec la profondeur sont qualitativement connues : l'empreinte thermique non encore dissipée de la dernière glaciation (voir document 60 : *Birch 1948* ; voir document 61 : *Carslaw & Jaeger 1988, éq. 2.13 (7), p. 85*, qui permet des calculs d'ordre de grandeur) et la circulation d'eau météorite "froide" dans les couches les moins profondes quand celle-ci est assez rapide (voir circulation karstique qui est observée dans les calcaires oxfordiens à certains forages par exemple).

II. L'Andra a menti pendant plusieurs années

L'Andra ne commencera à parler température, par l'intermédiaire du gradient, qu'après la note de A. Mourot (voir document 4 : *A. Mourot, 2002* ; voir pièce annexe 1-III).

a) Le bal de la négation commence par un petit article dans le journal de l'Andra, "La vie du Labo" n° 22, mai-juin 2003 (voir document 31 : *"La vie du Labo" n° 22, mai-juin 2003, p. 10* ; mis en gras par nous) :

"*«gradient géothermique». Il est, en moyenne, sur Terre, de 3 °C par 100 mètres. Dans le secteur du Bassin parisien où se situe le Laboratoire de Meuse/Haute-Marne, il est inférieur à cette moyenne.* (...) *Les mesures faites* (...) *dans* ***le forage de Cirfontaines-en-Ornois*** [HTM102]*,* ***confirment que le gradient géothermique local est faible.*** "

b) Puis, une lettre du 15/01/04 du président de l'Andra (voir document 34 : *lettre réf. Pdt/04-0001*) répond à une saisine écrite du 17/12/2003 du président du CLIS du Laboratoire de Bure et préfet de la Meuse, sur le respect de la RFS III.2.f au regard de la géothermie. Sur le critère de la température, le président, qui annonce qu'un rapport va suivre, écrit :

"*l'accroissement de la température avec la profondeur (gradient géothermique) est faible au regard des valeurs moyennes constatées sur le territoire français : en conséquence, l'eau contenue dans les roches du Trias, à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne, a une relativement faible température.* (...)
En outre plusieurs forages Andra ont fait l'objet de mesures de température qui permettent de préciser encore le gradient géothermique du secteur. (...)
"*... gradient géothermique... Autour du site du laboratoire, il est inférieur à la normale, de l'ordre de 2,5 à 2,7 °C/100 mètres. A l'emplacement du site, le Trias inférieur étant approximativement à 1500 m de profondeur, les estimations de températures varient de 50 à 55°C, en prenant respectivement des gradients géothermiques de 2,7 et 3,0 °C/100m, confirmant la faible valeur de la température de l'eau contenue dans les couches du Trias à cet endroit.*"

c) Et le rapport annoncé, daté de mars 2004 (voir document 35 : *Andra 2004 b*), fait dans la même confusion. Il confirme que le gradient des forages pétroliers des environs est bon. Puis, dans un tableau (voir document 35 : *Andra 2004 b, p. 15*), il donne les gradients des forages de l'Andra, tous d'une profondeur inférieure à 800 m (donc logiquement avec un gradient plus faible, comme expliqué plus haut). Il indique ensuite en mentant aussi délibérément (voir document 35 : *Andra 2004 b, p. 22*) :

> "*Les gradients géothermiques du secteur étudié par l'Andra sont donc nettement inférieurs aux gradients du nord-ouest de la zone d'étude, une valeur de 2,5 °C/100m jusqu'aux formations triasiques semblant être cohérente pour le forage HTM102.*"

Or, l'unique mesure un peu profonde qu'ils ont est celle de 3°C/100m au HTM102, et elle a été donnée comme normale par leur opérateur. L'auteur (et le vérificateur/approbateur) n'a pas hésité à supprimer 0,5°C/100m à la valeur mesurée.

La conclusion qui suit est vague et confuse (voir document 35 : *Andra 2004 b, p. 26*) :

> "*le gradient géothermique montre des valeurs tout à fait normales voire relativement plus faibles, notamment dans la partie centrale du secteur étudié par l'Andra.*"; "*Sur le secteur étudié par*

l'Andra, le gradient géothermique est encore moins intéressant pour une exploitation géothermique, celui-ci étant beaucoup plus faible".

d) Avant que ne soit présenté à l'Assemblée nationale et au Sénat le projet de loi relatif à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (qui deviendra ensuite la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006), l'Andra devait rendre un rapport sur la faisabilité de stockage des déchets. Ce rapport est le Dossier 2005 Argile, accompagné d'un référentiel reprenant les conclusions du rapport de l'Andra de 2004 (voir document 44 : *Andra 2005 a juin t1, chap. 8, p. 35 ; décembre et numérique, idem, p. 62*) :

"*le gradient géothermique montre des valeurs normales voire plus faibles que la normale, notamment dans la partie centrale du secteur étudié par l'Andra. Dans ce secteur, une valeur moyenne de 2,5°C/100 mètres, au moins jusqu'aux formations triasiques (forage HTM102), doit être retenue.*"

Cependant, le référentiel ne peut être obtenu que sur demande. Seul le Dossier 2005 Argile au sens strict a fait l'objet d'une distribution très vaste (disponible sur le site internet de l'Andra depuis 2005). Dans les 520 pages de ce dossier, l'aquifère du Trias n'est mentionné qu'une seule fois (voir document 43 : *Andra 2005 b, juin, II, p. 148 ; décembre, II, p. 152*) pour des problèmes autres de transport de matière entre les aquifères (Trias géothermique et un autre appelé Dogger). Le sujet de la géothermie est totalement absent de ce dossier. Cependant, il n'est pas tout à fait innocent que ce dossier décrive le gradient géothermique régional de la manière suivante (voir document 43 : *Andra 2005 b ; juin ou décembre, II, scan sur la p. 107*) :

Le gradient moyen est de 2,3 °C/100 m (Bauer, 2005) et (Andra, 2005a, fiche 16). Homogène sur l'ensemble de la zone de transposition, il est sensiblement plus faible que celui observé ailleurs dans le bassin, de l'ordre de 3,3 °C/100 m (BRGM & ELF Aquitaine, 1976). Les variations du gradient thermique avec la profondeur, déterminées essentiellement par les variations de conductivité thermique des formations, sont peu importantes. Dans le Callovo-Oxfordien, les variations d'argilosité (cf. § 3.3.1.4) sont également à l'origine de très faibles variations de ce gradient. Aucune variation brutale, généralement associée aux aquifères et à des circulations d'eaux importantes, n'est observée, en accord avec le schéma hydrogéologique du secteur caractérisé de manière générale par des écoulements lents.

"*Le gradient moyen est de 2,3°C/100m...Homogène sur l'ensemble de la zone de transposition...*"

Ce n'est pas le gradient des 600-700 premiers mètres (valable pour le Callovo-oxfordien) qui est décrit là, mais le gradient au niveau pétrolier (1500 à plus de 2000 m) puisque la phrase enchaîne :

"*...sensiblement plus faible que celui observé ailleurs... qui est de l'ordre de 3,3°C/100m (BRGM & ELF Aquitaine, 1976).*"

avec la référence bibliographique citée, donnée un peu plus loin, p. 506 (*décembre,* p. 508) :

"*BRGM & ELF Aquitaine (1976) Potentiel géothermique du Bassin parisien - Rapport de fin de contrat DGRST. Rapport n° 74.7.0990.*"

Or, cette référence est le rapport très connu Housse & Maget 1976 de Elf Aquitaine-BRGM basé sur l'ensemble des données pétrolières (voir document 37 : *Housse & Maget 1976*), qui sont donc des données profondes uniquement (essentiellement > 1500 m).

Le mensonge du rapport 2004 et du référentiel 2005 est donc encore accentué : de 2,5, on descend à 2,3 °C/100m. L'Andra soustrait maintenant 0,7°C/100m à la valeur de 3°C/100m mesurée par son opérateur dans son unique forage un peu profond. On cherchera, en vain, une autre information que celle-là dans le Dossier 2005 Argile. La nouvelle loi de 2006 qui désigne Bure comme unique site s'appuie pourtant entièrement sur ce dernier.

III. Forage EST433, rabotage de la température et données partielles

Après la réalisation du forage EST433, l'Andra ne donnera qu'une seule température, celle de "*66°C dans la chambre de test*" (voir document 62 : *Andra 2008, diap. 22* ; voir document 5 : *Andra 2009, p. 105*), et écrit même "*une température stabilisée de l'ordre de 66°C*" (voir document 5 : *Andra 2009, p. 109*). Pour les diagraphies postérieures, elle parlera de 65°C (voir document 5 : *Andra 2009, p. 107*) ou de 66°C (voir document 5 : *Andra 2009, p. 114*). Le gradient donné est maintenant de 3°C/100m (voir document 5 : *Andra 2009, p. 107, 114*).

L'Andra ne parle de la température que d'un seul test, le plus haut (et donc le plus froid), le n° 2, dont elle grignote au passage plus d'un demi-degré. En effet, d'une part, les deux sondes étaient à 66,5°C en fin de test et d'autre part, la température était, non pas "stabilisée", mais toujours en train de monter (voir figure P2-1).

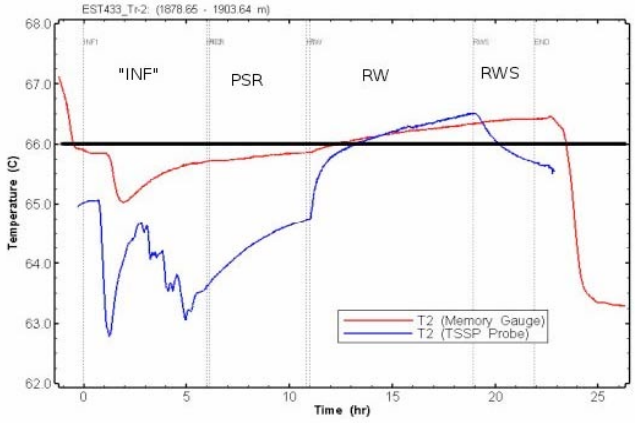

Figure P2-1 : Test n° 2, le seul pour lequel l'Andra donne une température. Il y avait deux sondes, les deux avaient atteint 66,5°C à la fin du test et la température était clairement toujours en train de monter. La courbe du haut, de la sonde dans l'intervalle de test, chute lors du déplacement du train de test. Celle du bas, de la sonde au dessus de l'intervalle de test, chute lorsque l'eau de formation arrête de couler suite à la fermeture de la valve d'obturation au début de "RWS" (voir document 6 : *SIS, fig. 3.2.3, p. 62*). On a ajouté une ligne sur 66°C pour une lecture plus facile.

La température augmentant avec la profondeur, celle du test le plus profond, le n°1, jamais donnée, ne pouvait qu'être supérieure à celle du test n° 2.

L'Andra fait disparaître ce test (donc ne donne pas la température) de la manière suivante :

> "*Un autre test a été effectué dans la zone inférieure.... La transmissivité déduite de ce test, 2,6 10^{-4} m^2/s, est nettement inférieure à celle déterminée pour la zone supérieure, confirmant ainsi les observations faites sur carottes (grès argileux) et en accord avec les diagraphies différées (porosité nettement inférieure à celle de l'horizon testé dans les "grès à Voltzia")* (voir document ? : Saunier Associés, 2009). *Cet horizon ne contribue donc que marginalement à la transmissivité totale de la formation.*" (voir document 5 : *Andra 2009, p. 105, cette conclusion est répétée par p.114*).

La transmissivité est dite inférieure, mais cela ne signifie pas qu'elle est mauvaise pour autant. La porosité de 10 - 15% est qualifiée de régulière et moyenne par GEO-RS (voir document 63 : *GEO-RS 2008, p. 37* ; celle au niveau du test n° 2 étant qualifiée de forte et régulière (*p. 38)*).

Pour les carottes, il n'y a eu que ~ 1,5 m carotté sur 25 m de test soit ~ 6 % (voir document 63 : *GEO-RS 2008, p. 15*, carotte K2-20 dont le haut est à 1951 m alors que la base du test est à 1952,6 m).

La valeur de transmissivité donnée vient du rapport des opérateurs (voir document 6 : *SIS 2009, p. 8*). Une telle valeur ne serait pas si différente de celle du test n° 2 (en aucun cas mauvaise). Malheureusement, ce test n° 1 n'est pas interprétable pour la perméabilité selon le rapport de contrôle réalisé sur le travail des opérateurs (voir document 11 : *Egis-géotechnique 2008, p. 6, tableau*) :

> "*Nous ne sommes pas d'accord avec l'affirmation que le test T1 a produit des réponses en pression qui convenaient pour la détermination des propriétés hydrauliques de la formation."*

Qualitativement, cependant, il n'y a aucun doute qu'on est bien dans un niveau d'intérêt pour la géothermie.

Pour le test n°1, le rapport des opérateurs indique par exemple (voir document 6 : *SIS 2009, p. 32*) :

> "*réponse rapide à des évènements de retrait individuels est aussi une indication d'une haute perméabilité de formation qui permet aux évènements transitoires de se dissiper rapidement.*"

Ce test n° 1 se trouve au milieu du Trias gréseux recoupé (la base n'ayant pas été atteinte ; voir document 63 : *GEO-RS 2008, p. 36*). C'est donc lui qui donnera la température médiane de cet aquifère géothermique.

La température maximale atteinte a été de 67,3°C (voir document 6 : *SIS, fig. 3.1.3, p. 23* ; fig. P2-2 ci-dessous; ensuite le train de test a été monté pour le test n° 2). Cette température n'est pas celle "non dérangée" de la formation et de son eau parce qu'elle a été mesurée trop peu de temps après le forage. Pendant un forage, il y a circulation permanente de boue "froide" qui refroidit progressivement la roche à partir des parois du forage. Les pétroliers ont donc un modèle classique pour corriger cet effet sans attendre des jours qu'un équilibre thermique se rétablisse.

Les équations de diffusion pour la théorie d'écoulement de la chaleur et celle de l'écoulement des fluides en milieu poreux sont les mêmes à la nature physique des paramètres près. Aussi retrouve-t-on le modèle classique le plus simple utilisé pour les perméabilité/transmissivité : celui de Horner (voir pièce annexe 3-IV) mais adapté aux échanges thermiques. Disons simplement qu'il permet de retrouver la température initiale, "non dérangée" de la roche et l'eau qu'elle contient.

Le calcul, en annexe, donne 68,5°C. Ce modèle sous-estimant légèrement la température, une correction a été proposée à l'université de Stanford qui aboutit ici à une température de ~ 69°C (voir annexe technique ci-dessous). C'est la température la plus probable au milieu de l'aquifère. Le gradient géothermique entre la surface et le milieu du test n° 1 doit donc être de l'ordre de :
(température du milieu de l'aquifère - température de surface) divisé par le nombre de centaines de mètres :
{69 - 10}÷19,21 ≈ 3,07°C/100m.

IV. Diagraphies postérieures

Des diagraphies de température ont été réalisées début septembre 2008 et en février 2009 (voir document 13 : *Andra 2010, p. 39*). Ces diagraphies ont été arrêtées à 1855 - 1875 m, ce qui est juste avant l'entrée dans les grès du Trias (qui commence à 1874,5 m profondeur forage ; voir pièce annexe 3-I), curieuse façon de faire "*pour l'évaluation du potentiel géothermique au droit du forage*", but annoncé par l'Andra (voir document 13 : *Andra 2010, p. 39*). Pour connaître la température de fond, il aurait fallu une sonde placée en permanence. Descendre un outil pendant quelques instants dans le puits rempli de fluide ne peut apporter que des réponses imparfaites. Comme il y a des mesures en descente et en montée et que l'outil provoque des mouvements de fluide dans le forage, nous n'avons pas de valeur unique. Les températures lues à 1856 - 1875 m sont de 65,8 à 67 °C (voir document 64 : *Schlumberger 2008-2009*). La seule information que ces diagraphies peuvent apporter, si elles sont représentatives de la température de la roche, est que l'on atteint au moins 66°C avant même d'entrer dans les grès du Trias avec un gradient qui atteint au moins 3°C/100 m {(>66 - 10)÷18,7= >3). C'est la valeur qui est donnée dans le rapport Andra 2009 (voir document 5 : *Andra 2009, p. 107, 114*).
Dans les documents destinés au public massivement distribués, l'Andra n'en continue pas moins de faire croire que le gradient est inférieur à la normale. Le Journal de l'Andra, Meuse - Haute Marne de printemps **2010** écrit (voir document 65 : *Le Journal de l'Andra Meuse – Haute Marne, printemps 2010, p. 11 ;* mis en gras par nous) :

"*Cette élévation de température est en moyenne de **3°C** par 100 mètres. **Dans le secteur** du Bassin parisien **où se situe le laboratoire souterrain, elle est inférieure à cette valeur.***"

V. Au-delà du Trias

Les couches gréso-argileuses ne s'arrêtent pas avec le Trias inférieur sous Bure. Elles continuent sur une profondeur remarquable de ~ 2800 m (jusqu'à ~ 4300 m NGF sous l'emplacement proposé pour Cigéo ; voir

figure P4-2 de la pièce annexe 4). Il s'agit cette fois de l'étage Permien (voir pièce annexe 4-III). L'Andra ne dit rien de cette autre cible géothermique.

La valeur du gradient géothermique en profondeur est forcément supérieure à ~ 3,07°C/100 m puisque cela est la moyenne surface-1921 m/surface alors que le gradient est de l'ordre de 2,5°C/100 m sur les premiers 700 m. Pour l'estimer, nous prenons comme point de départ la température de la sonde qui a été laissée plusieurs mois dans le forage à une profondeur de 835 m/surface (voir document 13 : *Andra 2010, t. 1 p. 39*) :

"*La température à cette profondeur est d'environ 31°C*".

On obtient alors sur l'intervalle avec le test n°1 : (69 - 31 =) 38° sur (1921 - 835 =) 1086 m, soit un gradient géothermique moyen de ≈ 3,5 °C/100 m.

Si on applique ce gradient à partir du milieu du test n° 1 (- 1563 m en cote NGF ; voir pièce annexe 3-I), on arrive à - 4300 m NGF à la base de cette série gréso-argileuse permienne à la température de (4300 - 1563 = 2737 × (3,5/100) = 95,8 + 69) ~ 165 °C. Comme on sait que le Permien est localement bon aquifère dans ses parties pas trop profondes (peut-être vers 100°C ; voir pièce annexe 4-III) et que, par ailleurs, l'Europe met au point des techniques pour augmenter la perméabilité là où elle est insuffisante (voir pièce annexe 4-IV), la zone même de Bure offre à priori, au moins sur le long terme, un potentiel géothermique sur une gamme de température**s** qui va de 66°C du sommet du Trias inférieur à 165°C à la base du Permien. C'est exactement le type de série profonde que l'ADEME et le BRGM recherchaient dans leur étude dite "CLASTIQ" de 2006-2008 sur le Bassin parisien. Mais le forage EST433 a été fait très tardivement et cette étude était alors terminée. Les techniciens de l'ADEME et du BRGM avaient pourtant indiqué clairement leur intérêt pour la zone de Bure (voir pièce annexe 1-V). En outre, à ces températures (à partir de 90°C), il est possible de produire un peu d'électricité par le cycle de Rankine (un fluide s'évapore à basse température par la chaleur transmise par la saumure géothermale et va actionner une turbine).

Annexe technique
Estimation de la température peu après le forage

Le modèle de Horner est basé sur la durée du temps de refroidissement qui correspond au temps de circulation de boue "froide" à l'endroit considéré, t_p, et se sert du "temps de Horner" défini comme $(t_p + \Delta t)/\Delta t$ où Δt est le temps qui commence à partir de l'arrêt du refroidissement (temps de Horner qui tend vers 1 pour un temps infini puisque t_p est constant et seul Δt varie → le temps s'écoule donc de la droite vers la gauche dans ce diagramme, dessiné plus bas ; voir aussi pièce annexe 3-IV).

Au bout d'un temps assez long, la solution semi-logarithmique de Horner ("semi" car seule l'expression du temps est en logarithme), produit une ligne droite :

$$T = m \log\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}\right) + T_i$$

Ceci donne la valeur voulue de T_i lorsque $(t_p + \Delta t)/\Delta t = 1$ [puisque log 1 = 0].

Le calcul peut être réalisé avec les données de la sonde située dans l'intervalle de test (voir figure P2-2, courbe du haut) sur la période d'augmentation lente, régulière, de la température entre 3 et 25 h de la figure. En effet, on entre ensuite dans les phases de mouvements de fluide avec la pompe et les données ne sont plus utilisables.

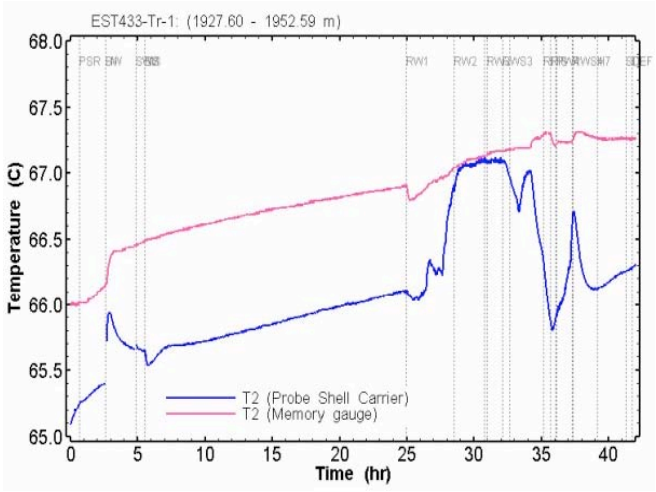

Fig. P2-2. Températures pendant le test n°1 : capteur à mémoire STS DL/N70 situé dans l'intervalle de test (ligne du haut) et capteur du segment TSSP au dessus de la valve d'obturation (ligne du bas) (voir document 6 : *SIS fig. 3.1.3, p. 23*)

Le texte du rapport SIS donne suffisamment de données pour calculer t_p et Δt, que l'on résume dans le tableau :

Calculs des temps pour le modèle de Horner				
SIS tab. 3.1.1 p. 24 et fig. 3.1.3 p. 23 (heures)		modèle Horner (heures)	$\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)$	T (°C)
foreuse au milieu de l'intervalle	- 132,3			
fin de forage	- 58	t_p = 74,3		
		Δt :		
fin des logs	- 35,3	22,7	4,27	
début insertion train de test	- 27,8	30,2	3,46	
démarrage test	0	58	2,28	66,00
SWS	5	63	2,18	66,47
intervalle isolé	15	73	2,02	66,73
intervalle isolé (avant RW1)	25	83	1,90	66,90

ce qui donne :

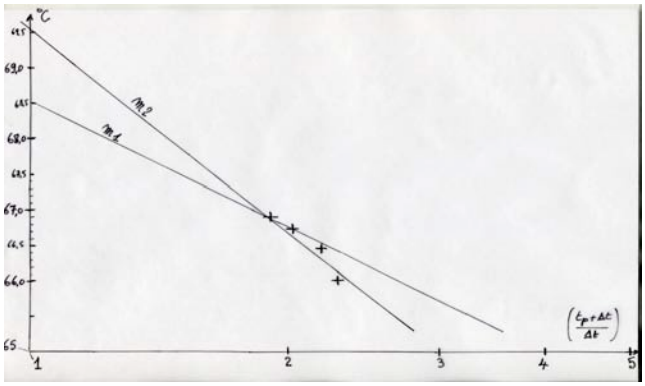

Fig. P2-3. Diagramme de Horner de température, test n°1.

La ligne droite *m1* (pente 5,83°C/cycle logarithmique, calculée sur papier millimétré, les droites sont reprises ici sur un calque) tracée sur les dernières données (les plus à gauche, qui sont les meilleures), l'intervalle de test étant isolé, donne une température T_i de Horner de 68,5 °C (au temps de Horner = 1 = intersection de la droite avec l'ordonnée). On a tracé une autre ligne possible (*m2* = 9,47°/cycle; T_i = 69,5 °C).

Le modèle de Horner ne donne la valeur correcte de T_i que lorsque le temps de récupération est assez long (en général pour fixer les idées, 120 h soit 5 jours). Sinon, parce que c'est une formule mathématique d'approximation, il est notable qu'elle donne une valeur inférieure à la valeur réelle de T_i. Roux et al. (voir document 65 bis : *Roux et al. 1980*) ont établi un procédé de correction. La valeur corrigée pour les dernières données, les deux points de la ligne *m1* ci-dessus (avec, en utilisant la notation et unités de Roux et al 1980 non détaillés ici : T^*_{ws} = 155,3°F; m = 10,32°F/cycle; $k/c_p \rho r^2$ = 0,4/h; t_{pD} = 29,72 et T_{DB} = 0,11) est de 69°C.